

Análise do impacto da inserção de veículos elétricos em sistemas elétricos de distribuição, focando distorções harmônicas de tensão

Fabrizio M. Silva*, Maycon D. Raghianti*, Fernando N. Belchior**, and Ivan N. Santos*

*Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 38400-902, Brazil,
(e-mails: fabriciomontes.silva@gmail.com, maycon.raghianti@gmail.com, ivan@ieee.org).

**Universidade Federal de Goiás, Aparecida de Goiânia/GO, 74968-755, Brazil,
(e-mail: fnbelchior@hotmail.com)

Abstract: This paper aims to analyze the possible impact of electrical vehicle insertion in a typical power distribution electricity. This work will focus on the increase in harmonic distortions. The research shows itself to be very relevant for being a recurrent subject in debates about electrical power systems. One reason for these discussions is that this insertion process may cause severe problems regarding power quality and load dispatch. In this technical report, a case study is performed by computing simulations using Matlab/Simulink, which are based on a real power distribution electricity grid in Uberlândia city, Brazil. In this study, different scenarios of electrical vehicle insertion are taking into account, considering sinusoidal and non-sinusoidal (background distortion) voltage supply. It is complemented with a critical analysis of the results and the challenges are identified.

Resumo: Este artigo tem como objetivo analisar o possível impacto da inserção de veículos elétricos em uma distribuição de energia elétrica típica. Este trabalho se concentrará no aumento das distorções harmônicas. A pesquisa se mostra muito relevante por ser um assunto recorrente nos debates sobre sistemas de energia elétrica. Uma das razões para essas discussões é que esse processo de inserção pode causar sérios problemas quanto à qualidade da energia e ao despacho de carga. Neste artigo, um estudo de caso é realizado por simulações computacionais utilizando o *Matlab/Simulink*, que se baseia em uma verdadeira rede elétrica de distribuição de energia na cidade de Uberlândia-MG, Brasil. Neste estudo, diferentes cenários de inserção de veículos elétricos estão levando em conta, considerando o fornecimento de tensão senoidal e não senoidal (distorção harmônica). Complementa-se com uma análise crítica dos resultados e os desafios são identificados.

Keywords: Electrical Vehicle; Harmonic Distortion; Power Distribution Grid; Power Quality; Smart Grid.

Palavras-chaves: Veículos Elétricos; Distorção Harmônica; Rede de Distribuição; Qualidade da Energia; Redes Inteligentes.

1. INTRODUÇÃO

Nota-se, na atualidade, um considerável e incontestável aumento, em nossa sociedade, da importância dada a questões atreladas com preocupações de ordem ambientais e relacionadas ao chamado desenvolvimento tecnológico sustentável. Dentro deste contexto, destacam-se a permanente busca por fontes energéticas não poluentes e renováveis, equipamentos e processos industriais mais eficientes, transportes urbanos mais eficientes, democratização do acesso aos desenvolvimentos tecnológicos, dentre outros.

No quesito transporte urbano, um antigo e ambicioso projeto vem sendo paulatinamente retomado, qual seja, o desenvolvimento de tecnologia que possa propiciar uma adequada inserção dos veículos à tração elétrica no ambiente urbano em detrimento aos tradicionais motores a explosão. Tal projeto tem-se mostrado atualmente factível devido, sobretudo, aos grandes avanços técnicos dos elementos constituintes dos mesmos, a saber: baterias com maior capacidade de acúmulo de carga e maior longa vida útil,

sistemas inversores mais eficientes e baratos, sistemas embarcados de controle mais confiáveis, etc.

O uso de veículos elétricos (VE's) nos grandes centros urbanos poderá trazer grandes avanços do ponto de vista ambiental, uma vez que os mesmos não realizam qualquer emissão de gases poluentes derivados de petróleo ou outros, são silenciosos, necessitam de temperatura relativamente baixa de funcionamento quando comparados com os veículos de motor à explosão, o nível de eficiência energética é muito superior aos convencionais, entre outros (Paine, 1990). Além disso, um dos principais desafios que o setor de transportes tem enfrentado na atualidade está associado à sua grande dependência com combustíveis fósseis, ou seja, aqueles derivados de petróleo (Borba, 2012), os quais não são considerados fontes energéticas renováveis. Neste ínterim, sabe-se que, mundialmente, o dispêndio energético do setor de transportes com esta forma de energia não renovável e altamente poluidora é da ordem de 94% com estimativa de diminuição para 82% até 2050 (EIA, 2019). Em termos nacionais, no Brasil, esta dependência é em torno de 76,8%

(MME, 2019), devido principalmente aos programas de incentivo ao uso de etanol e biodiesel.

Em São Paulo, a estimativa do elevadíssimo nível de emissão de gases poluentes lançados pelos veículos automotores, durante em 2018, chega a 314.848 toneladas de CO (CETESB, 2018).

Todavia, vale ressaltar, que a substituição de parte da frota, ou mesmo a totalidade desta, por VE não será o suficiente para a solução de todo o problema atrelado à questão dos transportes nos grandes aglomerados urbanos, pois, mesmo assim, o gargalo de infraestrutura viária que se é evidenciado permanecerá.

Não obstante às vantagens apresentadas, muitos desafios ainda se fazem presentes, para a efetiva implantação de tal desenvolvimento tecnológico, dentre os quais pode-se citar: diminuição dos custos dos equipamentos constituintes dos VE, sobretudo, dos acumuladores e inversores; elevação da autonomia do VE, principalmente no Brasil, país com dimensões continentais; estudos dos impactos relacionados à conexão dos VE's à rede de energia local; etc.

O presente trabalho de pesquisa visa contribuir com o desenvolvimento de estudos científicos voltados ao levantamento de eventuais problemas da inserção dos VE's à rede elétrica de distribuição no que diz respeito à qualidade da energia elétrica, uma vez que estes, via de regra, irão conectar ao sistema por meio de conversores de energia, os quais, por sua vez, são potenciais fontes poluidoras/depredadoras da qualidade do suprimento elétrico. Assim sendo, pretende-se, aqui, realizar simulações com diferentes cenários de inserção de VE's numa rede típica de distribuição para verificar o possível dano desta tecnologia nos indicadores de distorções harmônicas de tensão, o qual se mostra como sendo um dos principais fenômenos de qualidade da energia afetado.

2. ESTADO DA ARTE E PRINCIPAIS TOPOLOGIAS EMPREGADAS COMERCIALMENTE EM VE'S

Reconhece-se que os primeiros indícios do uso de veículos elétricos restauram uma história de mais de 150 anos (Simon, 2013). Foi em meados da década de 1830 que surgiram as primeiras demonstrações experimentais de veículos elétricos nos EUA e na Europa (Wakefield, 1998). Sabe-se do registro do protótipo de VE, conhecido como Bailey, que fora desenvolvido por Thomas Edison, nos EUA em 1903 (Edison, 2020).

Os VE's eram considerados sofisticados e uma grande promessa naquela época, pois não necessitavam de manivela para partida, emitiam menos ruídos e não necessitavam de troca de marchas (Paine, 1990). Entretanto, o grande problema em que os mesmos esbarravam, e que até recentemente ainda não havia solução, era a limitação dos acumuladores elétricos de energia que além de terem um alto custo, possuíam baixa autonomia e curta vida útil. Por isso, os veículos à combustão, incentivados por Ford e seu conceito de produção em larga escala, e também pela recente indústria do petróleo, ganharam mercado e aceitação em todo o mundo.

Em meados da década de 70, devido à crise do petróleo e também o surgimento de preocupações, por parte da sociedade, por questões de ordens ambientais, alguns governos criaram forças tarefas destinados à investigação da viabilidade VE's, contudo o esforço não surtiu qualquer efeito (Baran, 2012), pois veículos elétricos ainda apresentavam problemas relacionados com a autonomia.

Todavia, o desenvolvimento de novas formas de construção de acumuladores de energia, sobretudo, a recente introdução de baterias de íon-lítio, tem possibilitado que o principal entrave ao uso de VE's seja superado. Ademais, novas tecnologias e estudos vinculados aos chamados veículos híbridos tem ganhado muito espaço na indústria automotiva, o que tem elevado sobremaneira a autonomia destes e ao mesmo tempo aumentado o montante de investimentos em pesquisas e desenvolvimentos.

Neste cenário, segue abaixo um detalhamento das principais tecnologias e arranjos empregados comercialmente atualidade.

2.1 VE Híbrido

A palavra que melhor descreve o conceito de veículo elétrico híbrido é combinado. O VE Híbrido é uma combinação entre um motor de combustão interna e um motor elétrico. O que se tem com esta combinação é a redução da necessidade de grandes bancos de armazenamento de energia e o aumento da autonomia do veículo. Neste contexto podemos inserir a questão da eficiência energética, pois é sabido que, principalmente nas baixas rotações, os motores de combustão interna com o ciclo de Otto apresentam baixo desempenho energético (Borba, 2012). Sendo assim, fazendo o uso do motor de combustão interna para grandes distâncias e elevadas rotações, e utilizando-se do motor elétrico para um panorama contrário, ou seja, em situações do cotidiano onde não são permitidas grandes rotações. Com isto é possível uma utilização mais racional e eficiente da energia. Tal afirmação é válida, pois é de conhecimento que os motores elétricos atuais empregados em VE's possuem alto e constante rendimento, em geral maior que 90%.

Para os VE's híbridos, existem três diferentes topologias sendo empregadas, as quais variam de acordo com a forma de transmissão de energia para as rodas (Simon, 2013), a saber:

A) *Híbrido Série*

É aquele em que o motor a combustão interna age acionando um gerador elétrico de energia que, por sua vez, aciona o motor elétrico com conexão às rodas. Neste arranjo, em nenhum momento há transmissão direta do motor de combustão interna para as rodas do veículo (Junior, 2002).

B) *Híbrido Paralelo*

Aquele em que o motor elétrico contribui com o motor de combustão interna nas disposições em que o veículo possua maior solicitação de potência. Então, neste arranjo, os dois sistemas, tanto o de combustão interna, quanto o motor elétrico, podem entregar de forma independente ou conjunta tração ao veículo (Junior, 2002).

C) Híbrido Misto

É a situação em que há a atuação de dois motores elétricos, um atuando em série com o motor de combustão interna e outro trabalhando em paralelo com o motor de combustão interna. Isto é, o conceito de híbrido misto é uma combinação entre os dois arranjos apresentados anteriormente com o objetivo de potencializar os ganhos.

Outra forma de classificação comumente encontrada para os VE's híbridos é relacionada ao seu nível funcional e de potência do motor elétrico, neste grupo pode-se dividir os veículos em micro, mediano e completo (Chan, 2007).

O conceito de veículo híbrido *plug-in* somente se difere em relação aos híbridos tradicionais devido à possibilidade de serem conectados à rede elétrica para recarga das baterias. Portanto, os mesmos continuam mesclando os motores elétrico e de combustão interna, porém aproveitando os benefícios do uso de uma energia mais limpa e de custo marginal que é a energia da rede elétrica (Hirsh, 2009). Assim procedendo-se, o VE adquire uma maior autonomia e poderá utilizar o motor elétrico para percorrer maiores distâncias sem que haja, neste caso, necessidade de ativação, ou mesmo auxílio, do motor de combustão interna do automóvel.

O gerenciamento da carga da bateria nos VE's híbridos *plug-in* se distingue em duas estratégias (Bradley, 2009), isto é:

- **Modo Sustentação de Carga:** nesta situação a principal fonte de energia para o fornecimento de potência ao veículo é o combustível líquido, ou seja, o veículo estará operando através do motor de combustão interna, ou seja, o veículo preservará a carga da bateria através da utilização do motor de combustão interna até que o veículo e utilizará a carga da bateria apenas em situações específicas (baixa rotação do motor) ou no caso da falta de combustível para o motor a combustão.
- **Modo Depleção de Carga:** nesta estratégia de gerenciamento de carga o veículo se comporta como um VE puro, ou seja, o automóvel utilizará a energia armazenada em seu banco de baterias para percorrer determinada distância pré-estabelecida pelo fabricante, de acordo com o rendimento e a capacidade de armazenamento antes da ativação do motor de combustão.

É importante salientar que nos dois modos descritos acima os limites para sustentação como depleção são estabelecidos visando o prolongamento da vida útil das baterias (Heywood, 2007).

2.2 VE (puramente a baterias)

Os veículos elétricos puramente a baterias, ou simplesmente chamados veículos elétricos (VE's), possuem como única fonte de energia o seu banco de baterias. Não há, portanto, possibilidade de variação do modo de utilização de energia tal como nos híbridos, ou seja, a todo o momento a carga das baterias será depreciada, sem a possibilidade de utilização de outra fonte de energia para a manutenção da mesma. Por esse motivo os veículos elétricos puros possuem algumas características típicas que o diferenciam do veículo

movido à combustão, tais como: reduzido peso para aumento de sua autonomia e uso tipicamente urbano ou para deslocamento em pequenas distâncias na faixa, em geral, de 120km a 160km por recarga.

A título de comparação, a Figura 4 mostra o comportamento característico da operação das baterias nos diferentes arranjos de VE: híbrido, *plug-in* e puro (Duong, 2007).

Na Fig. 1 é possível observar-se que a capacidade de armazenamento das baterias de um automóvel elétrico puro é muito maior do que no caso dos arranjos híbridos em geral, pois durante todo seu período de funcionamento, este se encontrará no estado de depreciação de carga. Enquanto, o automóvel híbrido *plug-in*, devido sua possibilidade de carregamento, possui capacidade de armazenamento intermediária, pois, conforme já apresentado este tipo de veículo poderá operar em dois estados, ora como veículo elétrico puro (depleção de carga), ora como veículo movido a motor de combustão interna (sustentação de carga). Já os híbridos (não *plug-in*) não utilizam como forma de reter energia para uso no motor elétrico.

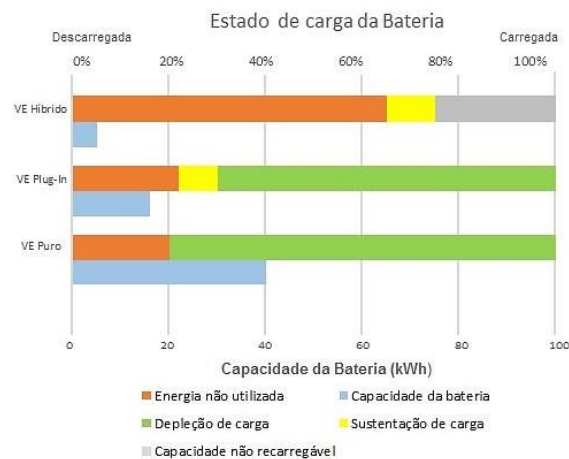


Fig. 1 Características gerais da utilização de baterias em VE's.

Vale ainda ressaltar que a tecnologia de VE de menor custo e também que vem ganhando maior inserção para uso urbano, são os VE's puramente a baterias. Neste sentido e objetivando um estudo sob o ponto de vista da conexão do VE's à rede local de distribuição, a pesquisa ora apresentada pautará pelo estudo do carregamento deste tipo de VE, qual seja, VE puro sem motor de combustão interna. E, para tanto, desde já, verifica-se uma autonomia destes veículos de cerca de 160km, com um tempo médio de recarga de 8 horas.

3. SISTEMA DE RECARGA DE BATERIAS DO VE'S

As baterias mais comumente empregadas em VE's (não híbridos) são as de níquel-cádmio (Ni-Cd), de chumbo-ácido e lítio-íon. Estas possibilitam uma maior autonomia para os VE's quando comparada às demais, pois as mesmas possuem uma maior densidade de energia (Duong, 2011) quando comparada às de outras tecnologias. Outra vantagem das baterias de lítio-íon é o fato do lítio ser o mais leve dentre os metais presentes na natureza (Duong, 2011), o que propicia um menor impacto do ponto de vista ambiental.

Para o presente estudo de caso foi utilizado um modelo de bateria íon-lítio existente no *Matlab/Simulink*. Tal modelagem é mais bem esclarecida na Fig 2.

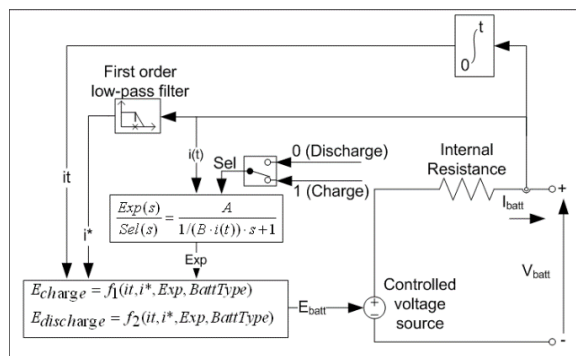


Fig. 2 Modelo de bateria do *Simulink* presente na biblioteca *SimPowerSystems*

O modelo anterior é disponibilizado pela ferramenta *SimPowerSystem* do *Matlab/Simulink*, *software* de ampla utilização e aceitação.

O carregamento das baterias de lítio-íon é dividido em duas etapas: num primeiro estágio de carregamento, impõe-se uma corrente constante. Esta etapa dura em torno de 30% do tempo total de carregamento (Dias, 2020), conforme pode ser observado na figura 8. Em uma segunda etapa, após a tensão atingir seu valor nominal de recarga, impõe-se uma tensão constante até que seja alcançada a carga total da bateria.

Esta estratégia de carregamento pode ser implementada via conversores CA-CC e/ou conversores CC-CC (Ahmed, 2000). Neste trabalho, em específico, será adotado conversores CA-CC não controlados em conjunto com conversores CC-CC (*Buck/Boost*) para o controle dos níveis de tensão e corrente de carregamento das baterias. Tal procedimento é elucidado na Fig. 3 e visa a preservação da vida útil do acumulador (Battery University, 2020).

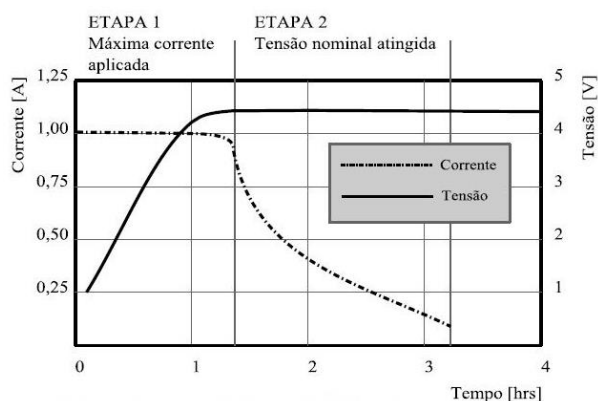


Fig. 3 Típica curva de carregamento de uma bateria de lítio-íon.

4. INSERÇÃO DO VE EM UMA TÍPICA REDE DE DISTRIBUIÇÃO – ESTUDO DE CASO

Neste momento será apresentado o estudo de caso realizado para efeito de avaliação do impacto da inserção dos VE's na rede de distribuição.

4.1 Rede Elétrica de Distribuição Seleccionada

Para o presente estudo, foi seleccionada uma rede de distribuição da cidade de Uberlândia/MG – empresa CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais). A mesma é composta de 54 unidades consumidoras residenciais, sendo o nível de curto circuito do barramento de média tensão (MT) igual a 50,5MVA. A Fig. 4 mostra o diagrama unifilar desta rede urbana de distribuição.

A carga média desta rede residencial é de 30,7kW, conforme detalhado na Tabela 1 (CEMIG, 2014). As impedâncias das linhas de distribuição (LD) de baixa tensão (BT) estão também informadas nesta tabela. No estudo, ora pautado, a carga será considerada como sendo puramente linear, ou seja, sem presença de fontes de distorções harmônicas. O transformador de distribuição utilizado, nesta rede, é de 30kVA, R% = 1%, X% = 3,5% e com conexão delta-estrela.

Assim, como se pode perceber, o transformador deste barramento se apresenta com uma carga média bem próxima à nominal do mesmo. Então, neste estudo, caso necessário, o mesmo será alterado de modo a atender o suprimento da carga do barramento de BT.

4.2 Cenários de Inserção Implementados

A cidade de Uberlândia, no ano de 2018, tinha uma população estimada de 683 mil habitantes e detinha uma média de 3,1 habitantes por residência (IBGE, 2020). Além disso, a frota era de aproximadamente 247 mil automóveis. Estes dados nos permitem afirmar que, a média de automóveis por residência, nesta cidade brasileira, era próxima de 1 (um) veículo por unidade residencial.

Tabela 1. Dados da Rede de Distribuição e dos Consumidores

Carga(s)	Potência (kW)	LD	Impedância (Ω)
1-8	5,44	01-02	0,032 + j0,011
9-13	3,04	01-13	0,028 + j0,009
14	0,74	02-03	0,025 + j0,008
15	0,56	03-04	0,005 + j0,001
16-18	1,51	03-05	0,028 + j0,009
19-26	3,83	03-06	0,006 + j0,002
27-32	2,64	04-07	0,028 + j0,009
33-34	0,95	05-08	0,032 + j0,010
35-38	1,33	06-09	0,030 + j0,010
39-43	2,78	07-10	0,036 + j0,012
44	0,9	08-11	0,033 + j0,011
45	0,82	10-12	0,035 + j0,012
46-48	2,39	13-14	0,005 + j0,001
49-53	4,57	13-15	0,004 + j0,001
54	0,18	13-17	0,029 + j0,009
-	-	15-16	0,034 + j0,011
-	-	17-18	0,024 + j0,008
-	-	18-19	0,025 + j0,008

No presente estudo investigativo do impacto da inserção de VE's na rede elétrica de distribuição, ora selecionada, serão considerados os seguintes percentuais (cenários) de inserção: 5%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Tendo em mente uma média de 1 veículo por unidade residencial, ou melhor, 1 veículo por unidade consumidora, na cidade de Uberlândia e, considerando a rede de BT selecionada, a qual possui um total de 54 unidades consumidoras, a Tabela 2 apresenta um detalhamento dos distintos cenários de inserção a serem avaliados.

Tabela 2. Perspectivas de Inserção de VE'S

Perspectivas de Inserção (%)	Nº de Automóveis	Fase AB	Fase BC	Fase AC
5	3	1	1	1
10	6	2	2	2
20	11	4	4	3
30	16	6	5	5
40	22	8	7	7
50	27	9	9	9

Percebe-se, pela Tabela 2, uma distribuição equilibrada dos VE's entre as fases deste sistema trifásico, visando, assim, uma minimização de possíveis desequilíbrios desta rede trifásica. Vale ainda ressaltar, que os VE's serão distribuídos no arranjo de BT obedecendo a proporcionalidade do número de unidades consumidoras em cada barramento e/ou suas potências instaladas.

Um outro ponto importante a ser esclarecido está relacionado à questão do horário de carregamento do VE. O processo de recarga de VE's, via de regra, ocorre no período noturno (INL, 2008), sobretudo, durante a madrugada. Pode-se afirmar que esta é uma tendência a ser seguida no Brasil, uma vez que os VE's são tipicamente de uso urbano para tarefas durante o dia e, também, por conta de normas que estão sendo discutidas, no país, para criação de tarifas energéticas

diferenciadas focando a redução dos picos de cargas no sistema elétrico.

Neste íterim, sabe-se que o perfil de carga de uma rede de distribuição é regulada com variações típicas ao longo das horas do dia e que, no período entre 0h e 6hs apresenta uma redução do nível de carregamento (Francisquini, 2006).

Por meio desta Figura 8, pode-se constatar que o carregamento típico de uma rede de distribuição residencial, a qual se apresenta como foco deste estudo de inserção de VE, possui uma carga em torno de 30% durante o período em pauta para recarga dos VE's. Diante disto, para efeito de simulação e estudos de inserção destas cargas especiais (VE's), será considerado que a carga convencional, encontrada no sistema durante o processo de recarga dos VE, será também de 30% do valor total da carga típica levantada para esta rede em particular, ou seja, a simulação considerará que os consumidores estarão consumindo 30% de sua carga nominal no período em que haverá a inserção dos VE's na rede em questão.

4.3 Simulações

Foi utilizada, para desenvolvimento desta pesquisa, a ferramenta *SimPowerSystem* do *Matlab/Simulink*. Este *software* foi empregado devido ao seu amplo uso no ramo da engenharia e também por se tratar de uma ferramenta confiável e de fácil manuseio, o qual possibilita o estudo das distorções harmônicas geradas/provocadas pelos conversores de acoplamento dos VE's à rede.

Para efeitos avaliativos, foi selecionada uma situação extrema em que todos os VE's conectados na rede se apresentam concomitantemente no momento de maior injeção de corrente distorcida (instante inicial do processo de recarga onde o controle mantém a corrente constante). Portanto, para o presente estudo, optou-se por uma simplificação do arranjo de recarga para esta situação. Ademais, sabe-se que a recarga, via de regra, conforme já argumentado, é realizada em

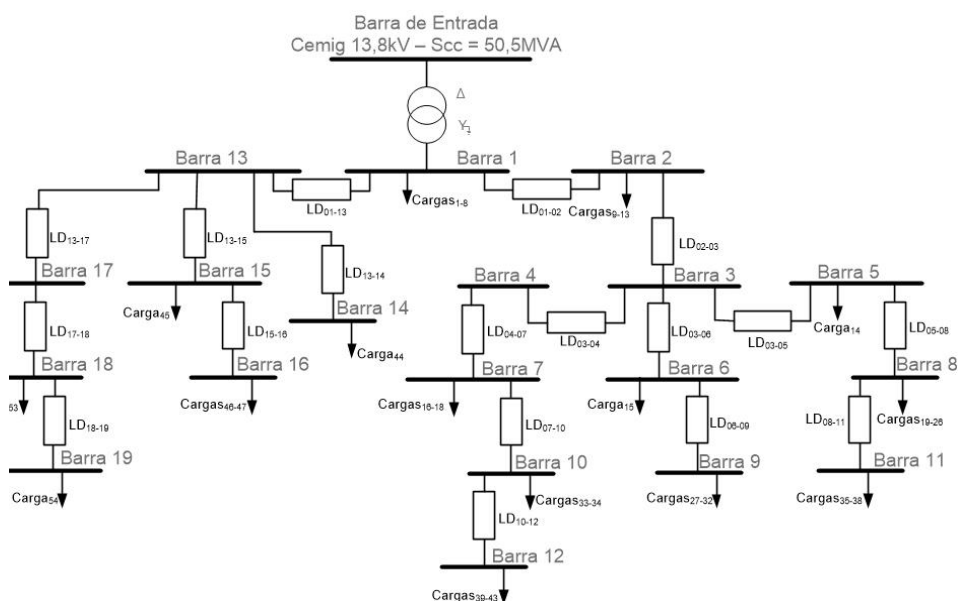


Fig. 4 Sistema elétrico de distribuição residencial selecionado para o estudo de caso.

períodos noturnos e com elevada possibilidade de simultaneidade.

Para efeitos de simulação, será considerado um VE com rendimento médio de 6km/kWh e uma autonomia de 180km (INL, 2008). Valor, este, que ainda pode ser aplicado nos dias atuais e será adotado neste estudo. Assim, tendo em vista um tempo de recarga da ordem de 8hs, a potência média de carregamento será de 3,75kW. Tal implementação computacional considera que os carregadores obedecem à IEC 61000-3-4 (IEC, 1998), normativa comumente citada nas certificações dos carregadores encontrados no mercado. Tais índices são a referência de injeção harmônica de corrente deste estudo e podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3. Índices de Injeção Harmônica de Corrente Conforme (IEC, 1998)

Ordem Harmônica	DII [%]
3	21,6%
5	10,7%
7	7,2%
9	3,8%
11	3,1%
13	2,0%

As simulações terão como foco a verificação das distorções harmônicas presentes no barramento de BT, neste caso, de 220V fase-fase, junto ao transformador de distribuição. Serão avaliadas as distorções harmônicas de tensão totais de componentes e global em cada fase. Os mesmos serão comparados com os valores de referência, para tais fenômenos, indicados nos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) (ANEEL, 2018). Para simplificação, serão descartados os índices harmônicos para ordens pares, que durante as simulações demonstraram valores insignificantes.

É considerado neste estudo um *background distortion* conforme índices demonstrados na Tabela 4 (Campello, 2016). Estes índices indicam valores típicos para construções comerciais, que possuem características de equipamentos instalados suficientemente próximas às residenciais, validando sua utilização para fins de estudo de caso.

Tabela 4. Limites de Injeção Harmônica de Corrente Para Carregador Monofásico de 3,75kW em Barramento de 45kVA de Potência de Curto Circuito

<i>Background Distortion</i>	
Ordem Harmônica	DIT [%]
3	2%
5	1%
7	1%
11	3%

4.4 Resultados das Simulações

Tem-se nas Tabelas 5 a 11 os valores resultantes da simulação da inserção dos VE's, na rede elétrica de BT

selecionada, para os respectivos percentuais de inserção: 10%, 20%, 30%, 40% e 50%.

Nestas tabelas, DTT% representa Distorção Total de Tensão Harmônica. Vale ainda ressaltar, que no cenário de inserção de 10% não houve necessidade de mudança do transformador. Contudo, para o ambiente de inserção de 20% foi considerado um cenário com o transformador trabalhando em sobrecarga e outro onde ele foi substituído por um de 75kVA. De agora em diante, o termo 'transformador' será substituído por 'trafo'.

No cenário de 40% a adoção de um transformador de 150kVA se fez necessária, porém como no caso de 20%, foi considerado trabalho em sobrecarga no transformador de 75kVA. Vale lembrar que, em todos os cenários de inserção, a carga linear da rede de distribuição foi considerada de 30% do valor destacado na Tabela 1 e o *background distortion*, conforme a Tabela 4.

Tabela 5. Harmônicos Resultantes – Trafo de 30kVA

Inserção de 10% de veículos elétricos			
Ordens Harmônicas	Distorções de Tensão (%)		
	Potência no Trafo = 32,2 kVA		
	Fase A	Fase B	Fase C
3	2,86%	0,72%	4,16%
5	2,67%	1,45%	1,23%
7	0,88%	0,83%	0,12%
9	0,78%	0,21%	0,6%
V _{FUND}	125 V	125 V	124,9 V
DTT ₁	4,39%	4,17%	3,48%
DTT ₃	2,96%	0,75%	4,2%
DTT%	5,29%	4,24%	5,46%

Tabela 6. Harmônicos Resultantes - Trafo de 45kVA

Inserção de 20% de veículos elétricos			
Ordens Harmônicas	Distorções de Tensão (%)		
	Potência no Trafo = 51,5 kVA		
	Fase A	Fase B	Fase C
3	3,82%	3,25%	5,88%
5	4%	3,16%	1,24%
7	2,01%	1,47%	0,79%
9	1,16%	0,37%	0,94%
V _{FUND}	124,4 V	123,3 V	123 V
DTT ₁	5,54%	5,43%	3,63%
DTT ₃	3,99%	3,27%	5,95%
DTT%	6,83%	6,33%	6,97%

Tabela 7. Harmônicos Resultantes - Trafo para 75kVA

Inserção de 20% de veículos elétricos			
Ordens Harmônicas	Distorções de Tensão (%)		
	Potência no Trafo = 51,9 kVA		
	Fase A	Fase B	Fase C
3	3,12%	1,25%	4,36%
5	2,8%	1,82%	1,08%
7	1,05%	0,96%	0,21%

Inserção de 20% de veículos elétricos			
Ordens Harmônicas	Distorções de Tensão (%)		
	Potência no Trafo = 51,9 kVA		
	Fase A	Fase B	Fase C
9	0,8%	0,25%	0,64%
V _{FUND}	125,5 V	124,9 V	124,7 V
DTT ₁	4,48%	4,51%	3,53%
DTT ₃	3,22%	1,27%	4,41%
DTT%	5,52%	4,69%	5,65%

Tabela 8. Harmônicos Resultantes - Trafo de 75kVA - Inserção de 30% de veículos elétricos

Ordens Harmônicas	Distorções de Tensão (%)		
	Potência no Trafo = 71,5 kVA		
	Fase A	Fase B	Fase C
3	3,26%	2,37%	5,68%
5	3,56%	2,56%	1,26%
7	1,6%	1,13%	0,64%
9	1,06%	0,35%	0,93%
V _{FUND}	124,4 V	124,5 V	123,7 V
DTT ₁	5,17%	4,91%	3,69%
DTT ₃	3,43%	2,4%	5,76%
DTT%	6,2%	5,47%	6,83%

Tabela 9. Harmônicos Resultantes - Trafo de 75kVA - Inserção de 40% de veículos elétricos

Ordens Harmônicas	Distorções de Tensão (%)		
	Potência no Trafo = 96,5 kVA		
	Fase A	Fase B	Fase C
3	3,7%	3,66%	6,8%
5	4,43%	3,41%	1,35%
7	2,24%	1,53%	0,95%
9	1,3%	0,38%	1,11%
V _{FUND}	123,1 V	123,2 V	122,4 V
DTT ₁	5,93%	5,44%	3,67%
DTT ₃	3,92%	3,68%	6,89%
DTT%	7,1%	6,56%	7,8%

Tabela 10. Harmônicos Resultantes - Trafo para 150kVA

Inserção de 40% de veículos elétricos			
Ordens Harmônicas	Distorções de Tensão (%)		
	Potência no Trafo = 97,3 kVA		
	Fase A	Fase B	Fase C
3	2,86%	0,96%	4,46%
5	2,74%	1,64%	1,14%
7	0,95%	0,85%	0,12%
9	0,8%	0,23%	0,68%
V _{FUND}	125,2 V	125,3 V	124,9 V
DTT ₁	4,4%	4,22%	3,53%
DTT ₃	2,97%	0,99%	4,51%
DTT%	5,31%	4,33%	5,72%

4.5 Análise dos Resultados

Conforme já afirmado, os resultados das simulações serão, neste momento, comparados com aqueles valores de referência

estabelecido no PRODIST (ANEEL, 2018) - legislação brasileira vigente para as redes de distribuição. Neste sentido, desde já, pode-se afirmar, que, para o nível de tensão sob foco, ou seja, de 220V, a DTT% a ser observada é de 10%. Complementarmente, a Tabela 12 mostra os valores que devem ser atendidos pelas distorções harmônicas totais para componentes pares não múltiplas de 3, ímpares não múltiplas de 3 e múltiplas de 3.

Tabela 11. Harmônicos Resultantes – Trafo de 150kVA - Inserção de 50% de veículos elétricos

Ordens Harmônicas	Distorções de Tensão (%)		
	Potência no Trafo = 120 kVA		
	Fase A	Fase B	Fase C
3	3,07%	1,46%	4,87%
5	3,2%	2%	1,24%
7	1,31%	1,06%	0,25%
9	0,92%	0,24%	0,73%
V _{FUND}	124,6 V	124,6 V	124,5 V
DTT ₁	4,73%	4,42%	3,49%
DTT ₃	3,2%	1,48%	4,92%
DTT%	5,72%	4,66%	6,04%

Tabela 12. Distorção Harmônica Total de Tensão Máxima de Componentes Permitida pela ANEEL

V _n ≤ 1,0 kV	DTT [%]
DTT _p	2,5%
DTT ₁	7,5%
DTT ₃	6,5%

Ficou-se, assim, evidenciado que para situações normais de operação, com o carregador dos veículos elétricos obedecendo aos limites de injeção de corrente harmônica estabelecidos pela IEC 61000-3-4 não há violação dos limites de tensão harmônica. Porém, para o estudo de caso apresentado, o cenário se inverteu quando houve sobrecarga no transformador abaixador do circuito (Tabela 9). Ressalta-se que os resultados serão extremamente dependentes da impedância harmônica da rede, do nível de distorção de corrente, do carregamento do sistema e do somatório das componentes harmônicas neste ponto de acoplamento.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi efetuado um estudo acerca da inserção dos veículos elétricos na rede de distribuição. Num primeiro momento, prezou-se por realizar um estudo do estado da arte das distintas tecnologias que vem sendo comumente adotadas, em termos mundiais, como estratégias de viabilização da inserção do VE em nossa sociedade. Neste sentido, foi mostrada a relevância desta tecnologia nos dias atuais, nos quais temas como sustentabilidade e eficiência energética têm ganhado destaque e importância. Todavia, esta inserção de VE's nos sistemas elétricos de distribuição podem impactar de forma negativa na qualidade da energia de fornecimento, uma vez que os mesmos se apresentam como potenciais fontes de distorções harmônicas. Diante disto, foram realizados estudos com diferentes cenários de inserção de VE, em uma típica rede

elétrica residencial brasileira. Os resultados de simulação apontam, de forma geral, que os carregadores dos veículos elétricos não violam os limites de distorção harmônica de tensão quando atendem a normativa IEC 61000-3-4 para cenários onde a rede trabalha dentro de seus valores nominais, mesmo com valores típicos de *background distortion*. Já quando decorre a sobrecarga no transformador, cenário provável ao ocorrer a inserção de VE's na rede (Pereira, 2017 e Piotrowski, 2019), a situação se inverte, ocorrendo violações normativas de distorção harmônica de tensão, conforme estabelecido no PRODIST. Com isto, reforça-se a necessidade das concessionárias estarem atentas ao carregamento de seus transformadores, visto que a entrada de veículos elétricos no mercado automotivo causará uma alteração nas curvas de cargas típicas das redes residenciais, podendo trazer casos de violação dos limites de distorção harmônica de tensão.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2018). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*.
- Ahmed, A. (2000). *Eletrônica de Potência*. Prentice Hall.
- Baran R. (2012). Tese de Doutorado, *A Introdução de Veículos Elétricos no Brasil: Avaliação de Impacto no Consumo de Gasolina e Eletricidade*. UFRJ, Rio de Janeiro-RJ.
- Battery University (2020). *Batteries as a Power Source*. <http://www.batteryuniversity.com>
- Borba, B. S. M. C. (2012). Tese de Doutorado, *Modelagem Integrada da Introdução de Veículos Leves Conectáveis à Rede Elétrica no Sistema Energético Brasileiro*. UFRJ, Rio de Janeiro-RJ.
- Bradley, T. H, Frank, A. A. (2009). *Design, Demonstration and Sustainability Impact Assessments for plug-in hybrid electric vehicles*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp 115-128.
- Campello, L. D., et. al (2016). 17th ICHQP. *Hosting Capacity of a University Electrical Grid Considering the Inclusion of Wind-turbines for Different Background Distortions*.
- Chan, C. C., (2007). *The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*. *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, pp. 704-718.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (2018). *Emissões Veiculares no estado de São Paulo*. <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2020/02/Relat%C3%B3rio-Emiss%C3%B5esVeicular-es-no-Estado-de-S%C3%A3o-Paulo-2018.pdf>, pp. 69.
- Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) (2014). *Base de Dados CEMIG, Software de Análise de Pedidos de Resarcimento APR*.
- Dias, C. O. (2020). Dissertação de Mestrado, *Estudo e Implementação Computacional de Sistema de Armazenamento de Energia com Conexão Direta ao Sistema Elétrico*. UFU, Uberlândia-MG.
- Duong, T. Q. (2007). *Research Needs: A Transportation Perspective – Applied Problems can be Addressed in a Fundamental Way*, Workshop on Basic Resarch Needs for Electrical Energy Storage.
- Edison, I. (2020). *Clean Energy Storage for a New Generation*. <http://ironedison.com/technical-info>.
- Francisquini, A. A. (2006). Dissertação de Mestrado, *Estimação de Curvas de Carga em Pontos de Consumo e em Transformadores de Distribuição*. Universidade de São Paulo, Ilha Solteira – SP.
- Heywood, J., Kromer, M. (2007). *Electric Powertrains: opportunities and challenges in the US light-duty vehicle fleet*. Sloan Automotive Laboratory Massachusetts Institute of Technology.
- Hirsh, R. F., Sovacool, B. K. (2009). *Beyond Batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition*. *Energy Policy*, vol. 37, pp. 1095-1103.
- Idaho National Laboratory (2008). *Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Infrastructure Review, Final Report*.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2020). *População estimada*. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/uberlandia/panorama>
- International Electrotechnical Commission (IEC) (1998). *IEC 61000-3-4, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part-3-4: Limits – Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16A*.
- Junior, A. R. P. (2002). Dissertação de Mestrado, *Regulação da Demanda de Energia em um Sistema de Propulsão para um Veículo Elétrico Híbrido Série*. UFRN, Natal-RN.
- Ministério de Minas e Energia (MME) (2019). *Balço Energético Nacional*.
- Orellana-Lafuente, C. (2011). Dissertação de Mestrado, *Carregador de Baterias Monofásico para Aplicação em Veículos Elétricos*. Universidade do Ceará, Fortaleza-CE.
- Paine, C. (2006). *Who Killed the Electric Car?* Sony Pictures
- Pereira, W. B., Peres, A. P., Pessanha, J. F. M. (2017). *IEEE Latin America Transactions Stochastic Model for Simulation of Transformers Supplying the Recharge of Electric Vehicles*, vol. 15, no. 10, pp. 1908-1916.
- Piotrowski, L. J., Knak, N. (2019). *IEEE Latin America Transactions. Methodology for Analysis of the Impact of Residential Charging of Electric Vehicles*, vol. 17, no. 6, pp. 953-961.
- Simon, E. C., (2013). Dissertação de Mestrado, *Avaliação de Impactos da Recarga de Veículos Elétricos em Sistemas de Distribuição*. UFRJ, Rio de Janeiro-RJ.
- U.S. Energy Information Administration (2019). *International Energy Outlook – 2019 with projections to 2050*. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf>
- Wakefield, E. H. (1998). 1ª Edição SAE International. *History of the Electric Automobile: Hybrid Electric Cars*.